

vSLAM のための画像局所特徴を併用した ICP の高速化法

Accelerated ICP exploiting image local features for visual SLAM

島田佳典[†] 和田俊和[†]
Yoshinori Shimada Toshikazu Wada

1. はじめに

測距センサやカメラなどを用いて、環境地図構築と自己位置推定を同時に行う Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) という技術がある。この中でもセンサとして単眼カメラを用いる手法を、visual SLAM (vSLAM) [1]と呼ぶ。vSLAM では、基準となるキーフレームとの間で対応点が見つかるフレームを用いて、3次元点群で表されるマップを構築する。これが行えない場合は、対応点探索が行える画像フレームからの再推定となる。つまり、この間の動画は破棄されるという問題点がある。

この解決策として、新たな座標系とキーフレームを設定して、自己位置推定とマップ構築を即座に再開し、このマップを以前のマップと統合すれば良い。つまり、当初と異なる座標系で表現されているマップの統合を行うのである。こうした統合には、Iterative Closest Point (ICP)アルゴリズム [2]がよく用いられる。しかし、これは反復アルゴリズムであり、収束までの計算回数が膨大になることが多い。

一方、マップに画素の輝度値を付与し、変換後の画素の輝度値ができるだけ一致するようにカメラ運動を推定する Direct 法に分類される vSLAM では、輝度値情報を扱うため、画像の局所特徴も自然に利用できる。通常の ICP で用いられる 3次元位置ベクトル群に加え、輝度値と局所特徴を用いることでより正確な対応点が求められ、ICP アルゴリズムの高速化が期待できる。

2. 関連研究

本章では、ICP アルゴリズムの高速化法に関する研究について述べる。

2.1 ICP アルゴリズムの様々な高速化法

ICP アルゴリズムの高速化法に関する、様々な研究が日々行われている。その例として、カラー距離画像センサによって得られる色情報を付加された点群 (色付き点群) を対象とした位置合わせ法として、垣内ら [3]は、色付き点群のグリッド内の色ヒストグラムを用いた高速な位置合わせを提案した。これは、並進と回転の下での二次元平面内の点群の位置合わせ用 ICP アルゴリズムである。具体的には、評価値最小化の手法として Downhill simplex 法を用い、 (X, Y, θ) をパラメータとした対象点群の座標変換を行い、目標点群との色ヒストグラムの誤差を最小化する方法だ。他研究では、ロバスト性向上のために M 推定を導入した位置合わせ法として、金子ら [4]が提案した M-ICP がある。奥田ら [5]は、M-ICP に多重解像度による階層化処理とデータ参照点選択処理を導入した高速化法 HM-ICP を提案した。

本論文では、Direct 法に分類される vSLAM の手法を用いるため、画像そのものが利用できる。このことに着目し、

[†] 和歌山大学 Wakayama University

SIFT [6]を用いた局所特徴をマップ内の各点に付与する。これにより、各点に含まれる属性情報が豊かになり、より正確な対応点が求められることによる ICP アルゴリズムの高速化が期待できる。

3. 別座標系 2 点群の高速統合手法

Direct 法の vSLAM は、動画の輝度値を直接利用し、自己位置推定とマップの構築が行える。この 3次元座標と輝度値の 2 種類の属性を持つ点で構成されたマップに、さらに、SIFT [6]を用いた画像の局所特徴を付与した新たな点群を作成する。これにより、この点群で取り扱う情報は、3次元の座標情報、1次元の輝度値情報、128次元の SIFT 特徴量情報の計 132次元となる。この特徴を利用した ICP アルゴリズムを提案し、その有効性を評価する。この処理に関するフローを図 1 に示す。

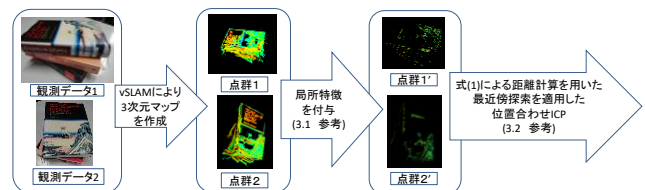


図 1 vSLAM からの本手法の流れ

3.1 画像を用いた SIFT 特徴量の付与

画像から SIFT [6]で検出される局所特徴点を中心として、スケール内に含まれる、マップ推定に使用された点を元の点群から抜き出す。このとき、この点に SIFT 特徴量を付与し、新たなマップを構築する。

3.2 SIFT 特徴量と輝度値情報を併用した ICP

一般的な ICP は 3次元位置ベクトル群に対して最近傍探索を適用し、求められた対応点群から、剛体変換を求めることを反復するアルゴリズムである。より正確な対応点を求めるために、3次元位置ベクトルに、128次元の SIFT 特徴量と 1次元の輝度値情報を付加した 132次元のベクトルへと拡張する。具体的には、3次元位置ベクトル $\mathbf{C} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ に加え、SIFT 特徴ベクトル $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{128}$ と輝度値 I を付与したベクトルへと拡張する。このベクトルを対象とした最近傍探索に関する距離計算において、輝度値と特徴ベクトルにそれぞれ係数 α と β を乗算し、重み付けを行う。 i, j を ICP で用いる 2点群の各要素とし、重み付けユークリッド距離として扱う。最近傍探索で用いるために計算する距離を $dist(i, j)$ とし

$$dist^2(i, j) = \|\mathbf{C}_i - \mathbf{C}_j\|^2 + \alpha(I_i - I_j)^2 + \beta\|\mathbf{D}_i - \mathbf{D}_j\|^2 \quad (1)$$

と定義する。ここで、 α と β は、各情報に対する重み付けである。この距離を元に最近傍探索を行い、点群の対応付けを行う。

4. 実験

まず, LSD-SLAM [7]について述べて, それを用いて求められたマップ間で ICP の計算を行う. パラメータ α と β についてはグリッドサーチを用いて決定する. その際の評価尺度は計算の反復回数とする. すなわち, 少ない Iteration の回数が低い値で収束するものが優れていると判定する. また, 最近傍探索により対応付けした点の 1 組あたりの平均距離が低いほど確度の高い位置合わせであるとする.

4.1 LSD-SLAM

Direct 法に分類される vSLAM の手法において, Large-Scale Direct Monocular SLAM (LSD-SLAM) [7]がある. これは, フレーム内の全ピクセルの輝度値を直接利用して対応付けを行うことにより, 3 次元座標と輝度値の 2 種類の属性を持つ点で構成された密なマップを構築する. この対応付けの前提として, 同一物体の輝度値が連続フレーム間で変化しないことを仮定している.

4.2 比較実験

本実験では, 2 種類の違う角度から観測したデータを LSD-SLAM [7]を用いて, 測位し, 得られたマップ間で統合を行う. 比較は, 式(5)の距離を元に最近傍探索を行った Iteration の回数と Iteration の n 回目における最近傍点の 1 組あたりの平均距離で判断する. このとき, n 回目の平均距離を $avgErr_n$ とし, これに対し, 初期の平均距離 $avgErr_0$ でスケールした $avgErr'_n$ とする

$$avgErr'_n = \frac{avgErr_n}{avgErr_0} \quad (2)$$

を, 平均距離として扱う. なお, $n \neq 0$ とし, 収束閾値 θ_d とする

$$\theta_d \geq avgErr'_n |avgErr'_{n+1} - avgErr'_n| \quad (3)$$

を満足させる場合に, ICP を収束させる. なお, 収束閾値 $\theta_d = 0.0001$ とする.

そして, α と β の値において適切な値を探索するために α の値を 0~30 の範囲で 2 刻み, β を 0~0.015 の範囲で 0.001 刻みでグリッドサーチを行った結果を図 2 に示す.

4.3 実験結果および考察

図 2 の結果から, $\alpha = 18, \beta = 0.001$ が最も適したパラメータであると言える. そして, 本手法を様々なデータで比較した結果, Iteration の 20 回未済ですべて収束することがわかった. その結果を従来の一般的な ICP と比較した結果の 1 つを図 3 に示す. この図からも, 従来手法より本手法は, Iteration の早期段階で収束しており, 高速化に成功したと言える. また, 比較結果から平均距離に関して, 従来手法より低い値を示す. これらのことから, 本手法は, 従来手法が Iteration の上限回数達する場合でも早期段階で収束し, 確度の高い位置合わせを行うことから有効であると考えられる. ただし, 本手法を vSLAM に適用する場合, 局所特徴を計算することが必要となる. これは, 新たなキーフレームが設定された時点で必要となる計算である.

5. おわりに

本研究では, vSLAM のための異なる座標系の 2 点群に関する高速な統合手法を提案した. 具体的には, Direct 法の vSLAM では, 画像そのものが利用できることを利用し,

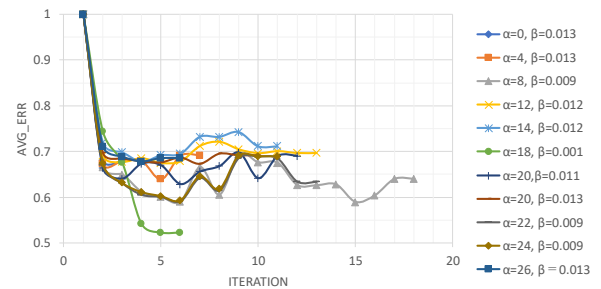


図 2 α と β を変更した場合の反復回数と平均距離の関係

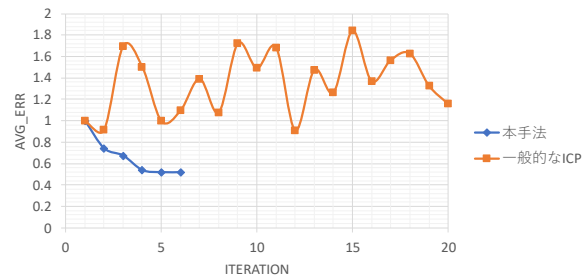


図 3 反復回数に対する 1 点当たりの平均距離 (一般的な ICP と本手法の比較結果)

画像の局所特徴を用いて, 3 次元位置ベクトルに輝度値と SIFT 特徴ベクトル付与した 132 次元のベクトルに対する最近傍探索を適用した高速 ICP 手法を提案した. 実験結果から 3 次元位置ベクトルのみで最近傍探索を行う従来の ICP と比較し, 本手法は Iteration の早期段階で収束する高速性を有している. また, 最近傍探索による対応点の平均距離が従来手法より低い値であることからより高精度な位置合わせが実現できている. そして, vSLAM の対応点探索が行えない場合にデータが破棄されるという問題点に対する解決の糸口になると考える. これに関する実装および今後の展望とする.

参考文献

- [1] J. Engel, J. Sturm, D. Cremers, "Semi-Dense Visual Odometry for a Monocular Camera," IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013.
- [2] P. J. Besl and N. D. McKay, "Method for registration of 3-D shapes," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, p. 239-256, 1992.
- [3] 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸, "色ヒストグラムを用いたカラー距離画像の高速位置合わせによる未知物体のモデリングを伴う生活環境地図作成," 日本ロボット学会誌, 第 29 巻, 第 8 号, pp. 694-701, 2011.
- [4] 金子俊一, 近藤友紀, 宮本敦, 五十嵐悟, "M 推定を導入したロボаст ICP 位置決め法," 精密工学会誌, 第 67 巻, 第 8 号, pp. 1276-1280, 2001.
- [5] 奥田晴久, 橋本学, 北明靖雄, 金子俊一, "階層化 M - ICP による高速・高精度な 3 次元位置照合手法," 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 第 2004 巻, 第 91 号, pp. 1-8, 2004.
- [6] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on, 1999.
- [7] J. Engel, T. Schöps and D. Cremers, LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, Conference on Computer Vision (ECCV), 2014.